

## 楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴界面最大 剪切应变的影响因素分析

彭文飞<sup>1,2</sup>, 闫超<sup>1,2</sup>, 张孝<sup>1,2</sup>, 束学道<sup>1,2</sup>, 朱健<sup>1,2</sup>, 吴焕铭<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 对楔横轧 42CrMo/Q235 层合轴进行轧制实验和有限元分析, 研究成形角、展宽角、断面收缩率、轧制温度对界面最大剪切应变的影响规律。结果表明: 成形角、轧制温度对最大剪切应变影响不大, 断面收缩率、展宽角对最大剪切应变影响较大; 展宽角越大, 界面两侧最大剪切应变差值越大; 断面收缩率越大, 界面两侧最大剪切应变差值越小。同时, 在最大剪切应变变化不大的情况下, 仍然有界面的结合与分离, 因此, 界面是否结合仅考虑最大剪应变是不充分的, 还需综合考虑其他指标的影响。研究结果对楔横轧层合模具设计和揭示界面结合机制奠定了基础。

**关键词:** 层合轴; 工艺参数; 界面最大剪切应变; 楔横轧

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0019-06

轴类零件多处于高温高压等恶劣服役环境, 容易发生轴的磨损、断裂等问题, 给设备带来安全隐患<sup>[1-2]</sup>。为解决上述问题, 传统方案是选用性能优良的高温合金钢、不锈钢等新材料<sup>[3]</sup>, 但新材料开发周期较长、成本昂贵。现阶段, 复合材料层合轴是可供选择的解决方案。复合材料层合轴是覆层材料选择耐高温、耐磨损的优质钢, 基层材料选择韧性好、成本低的普碳钢。主要成形方法是利用楔横轧在高温、高轧制力的优势, 促使层状材料的界面焊合, 实现了层合轴能够在复杂环境工作以及成本降低的要求。

层合材料的研究多集中于层合板和层合棒的成形方式和界面结合性能上。Aratani 等<sup>[1]</sup>利用有限元模拟讨论工艺参数对挤压成形 Al/Cu 双金属棒界面结合性能的影响, 测定界面金属流动速率, 通过实验材料变形、径向应变和界面强度进行验证<sup>[1]</sup>。Lee 等<sup>[4]</sup>研究二次温轧和退火处理对轧制 STS-Al-Mg 层合板界面微观组织和机械性能的影响。Jeon 等<sup>[5]</sup>通过有限元和实验方法来探测不同工艺参数

对 Al-Cu 双层片的变形特性的影响, 并得到双层片的轧制力-厚度分析模型。Manesh 等<sup>[6]</sup>利用上限定理, 建立了冷轧对称层状材料的数学模型, 研究层状材料的塑性变形行为, 并通过实验得到很好的验证。Jing 等<sup>[7]</sup>对不锈钢和碳素钢在氩气环境下进行热轧, 通过结合和剥离试验测试界面强度, 发现多道次热轧可以提高界面抗拉强度。对于楔横轧双金属层合轴的研究较少。刘文萍等<sup>[8]</sup>通过有限元模拟, 对楔横轧同种材料层合轴展宽段应力进行了分析, 验证了楔横轧同种材料层合轴的可行性。张建华等<sup>[9]</sup>通过有限元模拟对楔横轧层合轴界面结合机理进行了研究, 为改善层合轴界面处的结合质量提供了理论依据。彭文飞等<sup>[10-12]</sup>通过有限元数值模拟对楔横轧层合轴应力分布进行了分析。然而, 层合轴界面结合机制还不明确, 本文将从剪切应变的角度分析其对界面结合的影响。

为较好地研究影响楔横轧复合材料层合轴的因素, 本文基于楔横轧层合轴有限元模型, 结合轧制实验, 分析工艺参数对剪切应变的影响及剪切

收稿日期: 2017-11-07.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51405248, 51475247); 山东省重点研发计划(2016ZDJQ0604); 浙江省自然科学基金(LY18E050006); 宁波市自然科学基金(2017A610088); 宁波市工业类重大科技计划(2016B10046)。

第一作者: 彭文飞(1983-), 男, 云南普洱人, 博士后/副教授, 主要研究方向: 塑性成形技术及复合材料成型。E-mail: pengwenfei@nbu.edu.cn

应变在界面结合/分离过程中的影响机制。

## 1 实验与有限元模型

### 1.1 材料准备与轧制实验

覆层材料选择高强度钢 42CrMo, 其外径尺寸为 40 mm, 基层材料选择普碳钢 Q235, 基材直径  $d$  随实验的要求改变。将表面处理后的覆材和基材以小过盈配合的方式组装, 对层合轴坯料的两端面进行焊接, 覆材和基材的组装过程如图 1 所示。将坯料在中频加热炉中加热后, 放入 H630 楔横轧机(宁波大学浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室)进行轧制(图 2)。对获得的轧件从正中心位置沿径向线切割, 得到对称的 2 个剖开轧件; 选取其中之一轧件, 通过金相试样研磨机对其表面进行打磨, 观察打磨后的轧件界面是否结合。

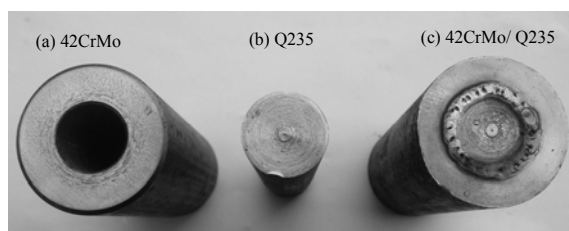


图 1 覆材和基材组装

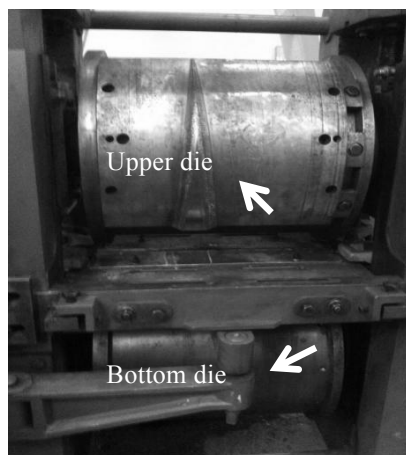


图 2 楔横轧机 H630

### 1.2 轧制模型的简化

楔横轧复合材料层合轴的有限元建模在文献[12]中已经建立, 且证明了有限元模型的正确性, 故本文不再赘述模型建立的假设条件与有限元模型的验证。建立的层合轴有限元模型如图 3 所示, 选择如图 4 所示的覆材与基材单元, 获得界面两侧的最大剪应变。

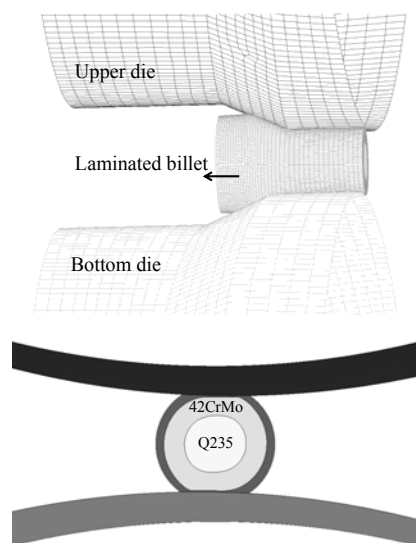


图 3 楔横轧复合材料层合轴有限元模型

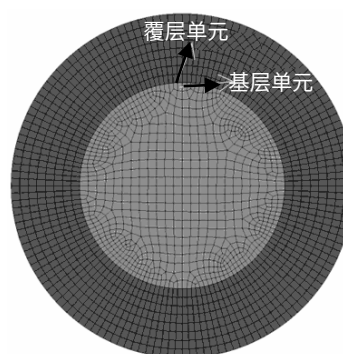


图 4 基层单元和覆层单元的选择

## 2 工艺参数对最大剪应变的影响

### 2.1 成形角的影响分析

选取展宽角  $\beta=3^\circ$ , 断面收缩率  $\psi=55\%$ , 温度  $T=1050^\circ\text{C}$ , 基材直径  $d=22\text{ mm}$ , 成形角  $\alpha=24^\circ, 27^\circ$  和  $30^\circ$  的工艺参数, 进行轧制实验, 处理后的轧制界面横截面图如图 5 所示。在成形角为  $24^\circ$  和  $30^\circ$  时, 界面状态都结合。对上述 2 组不同工艺参数的实验进行有限元模拟, 分析整个轧制过程中, 轧件界面覆材单元和基材单元所对应的最大剪应变的变化情况。

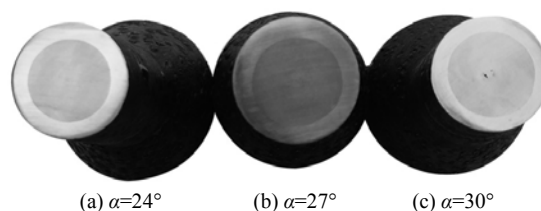


图 5 不同成形角条件下的轧件横截面图

如图 6(a)所示, 当成形角为  $24^\circ$  时, 基材应变为 0.75, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.45. 如图 6(b)所示, 当成形角在  $30^\circ$  时, 基材应变为 0.9, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.6. 结合图 5, 随着成形角的改变, 结合界面两侧剪应变差变化并不明显, 界面分离趋势不大, 成形角对界面结合影响不大.

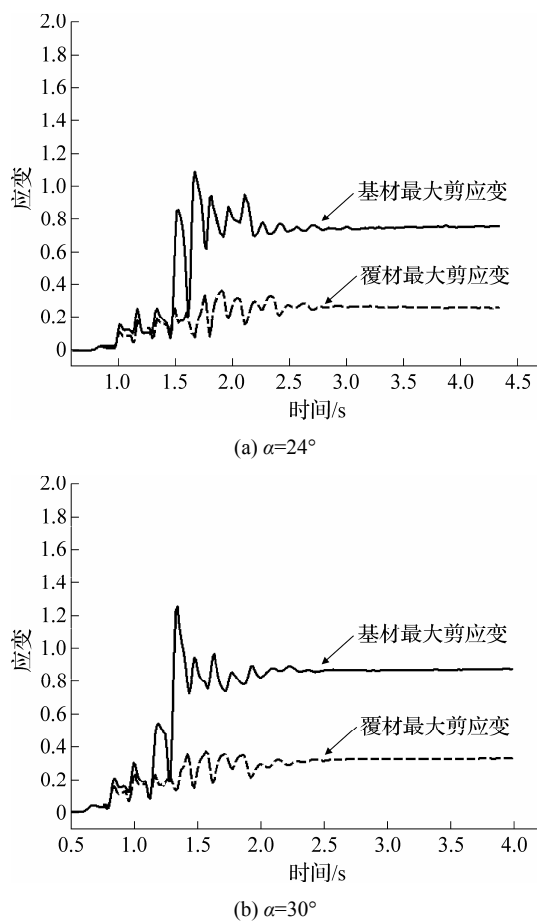


图6 成形角对界面最大剪切应变的影响

## 2.2 展宽角的影响分析

当成形角  $\alpha=27^\circ$ , 断面收缩率  $\psi=55\%$ , 温度  $T=1050^\circ\text{C}$ , 基材直径  $d=22\text{ mm}$ , 展宽角  $\beta$  在  $3^\circ$ ,  $5^\circ$  和  $7^\circ$  变化时进行轧制实验, 将轧制后的层合轴在轴件中间横截面位置沿径向进行线切割. 如图 7 所示, 在展宽角为  $3^\circ$  和  $7^\circ$  时, 界面状态分别为结合、分离. 对上述 2 组不同工艺参数的实验进行有限元模拟, 分析轧制过程中轧件结合界面覆材和基材单元所对应的最大剪应力的变化情况.

如图 8(a)所示, 当展宽角在  $3^\circ$  时, 基材应变为 0.8, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为

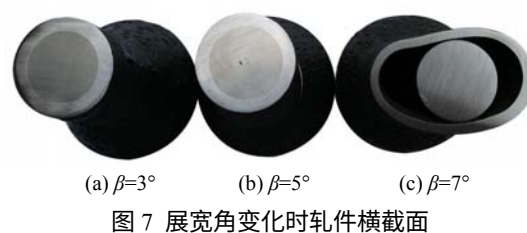


图7 展宽角变化时轧件横截面

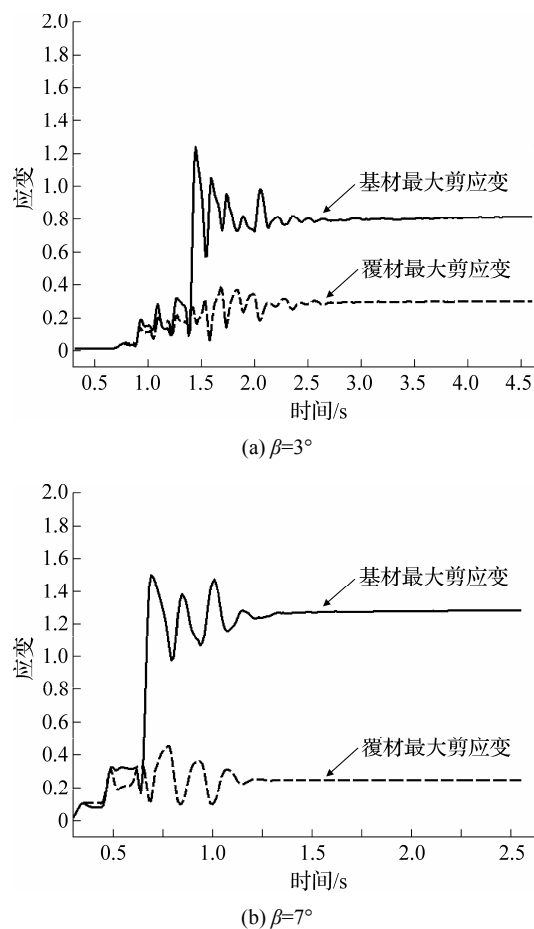


图8 展宽角对界面最大剪切应变的影响

0.5. 如图 8(b)所示, 当展宽角为  $7^\circ$  时, 基材应变为 1.25, 覆材应变为 0.25, 结合界面两侧剪应变差约为 1. 结合图 7, 随着展宽角的增大, 结合界面两侧剪应变差显著增大, 界面分离趋势增大, 界面不易结合. 结合其他轧制实验, 展宽角选择  $5^\circ$  以下有利于界面的结合.

## 2.3 断面收缩率的影响分析

当成形角  $\alpha=27^\circ$ , 温度  $T=1050^\circ\text{C}$ , 展宽角  $\beta=3^\circ$ , 基材直径  $d=22\text{ mm}$ , 断面收缩率  $\psi$  在  $50\%$ ,  $55\%$ ,  $60\%$  和  $65\%$  变化时, 进行轧制实验, 处理后的轧件界面横截面如图 9 所示, 可以发现界面先分离, 再

结合, 最后再分离的过程. 因此对断面收缩率为 50%, 55% 和 65% 时进行有限元模拟, 分析整个轧制过程中, 轧件界面覆材和基材单元所对应的最大剪应变与最大剪应力的变化情况(图 10).

如图 10(a)所示, 当断面收缩率为 50% 时, 基材应变为 0.95, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.65. 如图 10(b)所示, 当断面收缩率增大到 55% 时, 基材应变为 0.8, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.5. 如图 10(c)所示,

当断面收缩率增大到 65% 时, 基材应变为 0.6, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.3.

由此可知, 当断面收缩率从 55% 增大到 65% 时, 剪应变差值不断减小, 界面分离趋势减弱, 界面易结合. 但如图 9(d)所示, 通过实验发现断面收缩率在 65% 以上时, 界面发生了分离, 此时需要考虑界面剪应力的影响. 从图 10(d)可知, 覆材界面剪应力在成形过程中有较大的突变, 界面反而不易结合. 因此, 断面收缩率需要在一个合适的范围

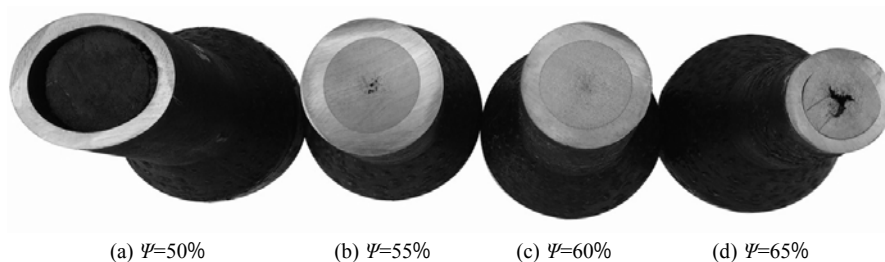


图 9 断面收缩率变化时轧件横截面图

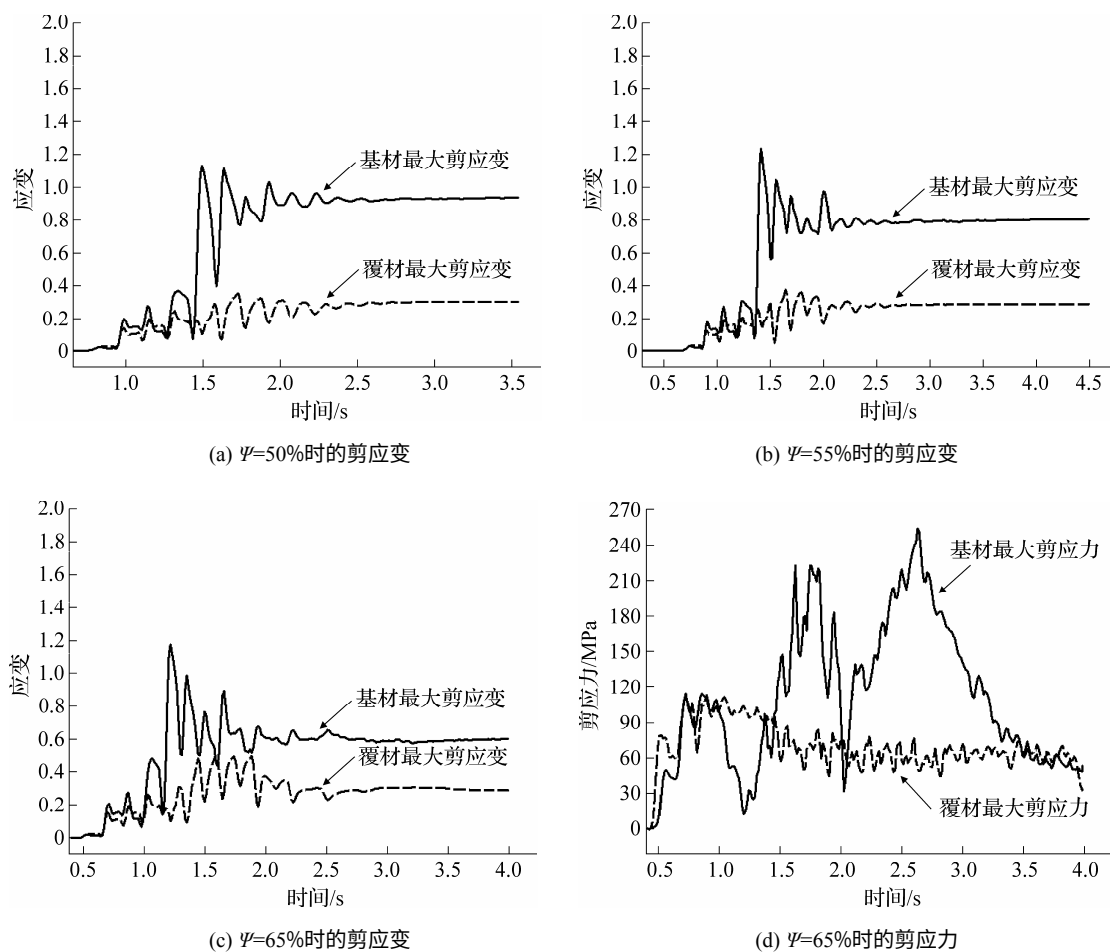


图 10 断面收缩率对界面最大剪应变及剪应力的影响

(55%~60%), 有利于界面的结合。

## 2.4 轧制温度的影响分析

当成形角  $\alpha=27^\circ$ , 展宽角  $\beta=3^\circ$ , 断面收缩率  $\psi=55\%$ , 基材直径  $d=22\text{ mm}$ , 温度  $T$  在  $950^\circ\text{C}$ ,  $1050^\circ\text{C}$  和  $1150^\circ\text{C}$  变化时, 进行轧制实验, 处理后的轧件界面横截面如图 11 所示。在温度为  $950^\circ\text{C}$  和  $1150^\circ\text{C}$  时, 界面状态分别为分离、结合。对上述 2 组不同工艺参数的实验进行有限元模拟, 分析整个轧制过程中轧件界面覆材和基材单元所对应的最大剪应变的变化情况(图 12)。

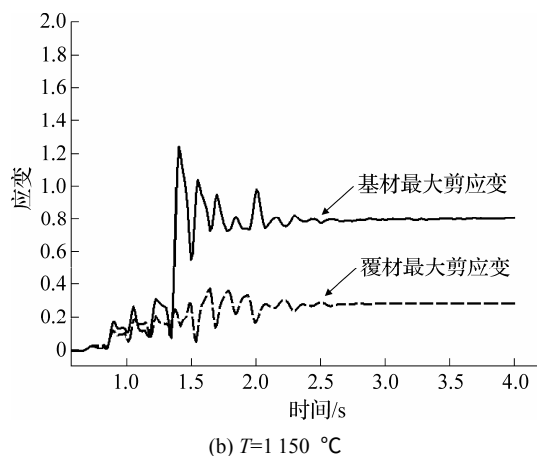
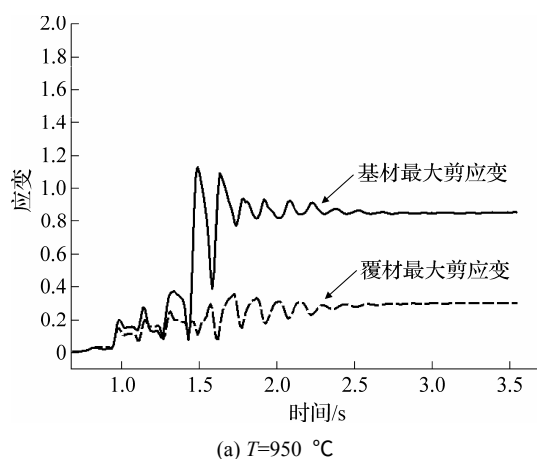
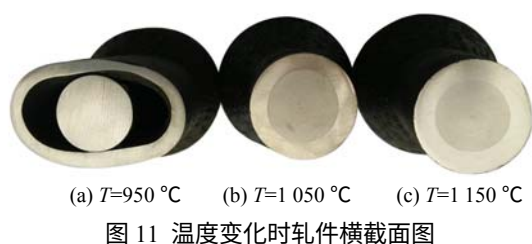


图 12 轧制温度对界面最大剪切应变的影响

如图 12(a)所示, 当轧制温度为  $950^\circ\text{C}$  时, 基材应变为 0.9, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变

差约为 0.6。如图 12(b)所示, 当轧制温度为  $1150^\circ\text{C}$  时, 基材应变为 0.8, 覆材应变为 0.3, 结合界面两侧剪应变差约为 0.5。

由此可知, 当轧制温度增大时, 界面两侧剪应变差值略微减小, 界面分离趋势减弱, 界面更易结合。但是, 轧制温度需要在一个合适的范围( $1050^\circ\text{C}$ ~ $1100^\circ\text{C}$ ), 有利于界面的结合。

## 3 结论

(1)成形角、轧制温度对最大剪切应变影响不大, 断面收缩率、展宽角对最大剪切应变影响较大。

(2)断面收缩率越大, 界面两侧最大剪切应变差值越小, 差值小时界面也有分离的趋势; 轧制温度的变化, 界面最大剪切应变变化不大的情况下, 仍然有界面的结合与分离, 说明界面是否结合仅考虑最大剪应变是不充分的, 还需要综合考虑其他指标的影响。

(3)小展宽角(通常为  $\leq 5^\circ$ )、适中的断面收缩率(55%~60%)、轧制温度( $1050^\circ\text{C}$ ~ $1100^\circ\text{C}$ )时, 可以提高界面结合概率。

## 参考文献:

- [1] Aratani M, Ishiguro Y, Hashimoto Y, et al. Development of UTS 980 MPa grade steel tube with excellent formability for automotive body parts[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 199(11):213-224.
- [2] 杨合, 李落星, 王渠东, 等. 轻合金成形领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12):31-42.
- [3] Cassada W, Liu J. Aluminum alloys for aircraft structure[J]. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(12):27-29.
- [4] Lee K S, Dong H Y, Kim H K, et al. Effect of annealing on the interface microstructure and mechanical properties of a STS-Al-Mg 3-ply clad sheet[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 556(5):319-330.
- [5] Jeon C H, Han S W, Joo B D, et al. Deformation analysis for cold rolling of Al-Cu double layered sheet by physical modeling and finite element method[J]. Metals & Materials International, 2013, 19(5):1069-1076.
- [6] Manesh H D, Taheri A K. Theoretical and experimental investigation of cold rolling of tri-layer strip[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2):163-172.
- [7] Jing Y, Qin Y, Zang X M, et al. The bonding properties

- and interfacial morphologies of clad plate prepared by multiple passes hot rolling in a protective atmosphere[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1686-1695.
- [8] 刘文萍, 彭文飞, 束学道, 等. 楔横轧同种材料层合轴的展宽短应力分析[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5):82-87.
- [9] 张建华, 彭文飞, 沈法, 等. 基于应力应变的楔横轧层合轴分界面结合机理研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(17):80-83.
- [10] Peng W F, Zhang J H, Huang G X, et al. Stress distributions during the cross-wedge rolling of composite 42CrMo/Q235 laminated shafts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1): 145-155.
- [11] Wu Z J, Peng W F, Shu X D. Influence of rolling temperature on interface properties of the cross wedge rolling of 42CrMo/Q235 laminated shaft[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1):517-526.
- [12] 彭文飞, 朱健, 束学道. 工艺参数对楔横轧 42CrMo/Q235 复合材料层合轴厚径比的影响[J]. 复合材料学报, 2017, 34(1):160-167.

## Influence factors of the interface maximum shear strain of composite 42CrMo/Q235 laminated shaft formed by cross wedge rolling

PENG Wen-fei<sup>1,2</sup>, YAN Chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao<sup>1,2</sup>, SHU Xue-dao<sup>1,2</sup>, ZHU Jian<sup>1,2</sup>, WU Huan-ming<sup>1,2</sup>

( 1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** The rolling experiments and finite element analysis of cross wedge rolling of 42CrMo/Q235 laminated shaft are carried out. The influence rules of forming angle, spreading angle, area reduction and rolling temperature for the interface maximum shear strain are investigated. The results show that the forming angle and rolling temperature have insignificant effect on the interface maximum shear strain. The area reduction and spreading angle have great impact on the interface maximum shear strain. The larger the spreading angle, the larger difference of the maximum shear strain on both sides of the interface. The larger the area reduction, the smaller difference of the maximum shear strain on both sides of the interface. Also found is that, if the maximum shear strain does not change much, there still occurs lamination or separation between clad and core materials. Other than considering whether the interface is combined with only the maximum shear strain, the influence of other factors also needs to be considered in most cases. The results provide the foundation for the die design of cross wedge rolling of laminated shaft and manifest the interface bonding mechanism.

**Key words:** laminated shaft; process parameters; interface maximum shear strain; cross wedge rolling

(责任编辑 章践立)